МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE





УДК 531.788
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-1-43-51

Оригинальное эмпирическое исследование

Исследование оптимальной глубины вакуума, создаваемой эжектором в зависимости от величины питающего давления



EDN: MPXOWG

С.И. Савчук, **Э.Д. Умеров**✉, **А.У. Абдулгазис**
Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, г. Симферополь, Республика Крым
✉ Ervin777@yandex.ru

Аннотация
Введение. Вакуумные эжекторы, работающие по принципу Вентури, применяются в различных отраслях промышленности и являются незаменимыми пневматическими устройствами. Важной характеристикой вакуумного эжектора является создаваемая глубина вакуума, где максимальное значение вакуума достигается в определенном интервале питающего давления. Несоблюдение питающего давления влияет на производительность самого эжектора и автоматизированных вакуумных систем в целом. Одним из вариантов решения данной проблемы является установление рекомендуемого диапазона питающего давления в достаточно узком интервале давлений, при котором достигается гарантированное значение глубины вакуума, не используя максимальные возможности эжектора. При этом в технической литературе не приводятся значения зависимости глубины вакуума от питающего давления на всем диапазоне работы эжектора, на которые авторы хотели бы обратить внимание в рамках данной работы. Цель работы — проведение экспериментальных исследований по установлению фактических значений максимальной глубины вакуума в зависимости от величины входного давления эжектора.
Материалы и методы. Для проведения экспериментальных исследований был спроектирован, изготовлен и использован специальный стенд, позволяющий осуществлять исследования вакуумных эжекторов, работающих на основе принципа Вентури. Данный стенд позволяет установить точное значение вакуума в зависимости от входного питающего давления для эжекторов, имеющих диаметр сопла от 0,1 до 4,0 мм, что полностью перекрывает весь диапазон эжекторов, применяемых в реальных секторах экономики. Были исследованы вакуумные эжекторы семейств VEB, VEBL, VED и VEDL производства компании Camozzi в интервале входного питающего давления эжектор от 2,0 до 6,5 бар. Экспериментально определялись фактические значения глубины вакуума в зависимости от величины входного питающего давления для каждого эжектора, а также максимальные значения глубины вакуума, достигаемые каждым эжектором при соответствующем значении входного питающего давления.
Результаты исследования. Экспериментально доказано, что рекомендуемые значения входного питающего давления приведенных в каталогах фирм производителей эжекторов не всегда соответствует действительным значениям. Показано, что отличается и характер полученных графиков. В этой связи необходимо вводить корректировку величины входного питающего давления для достижения максимальной глубины вакуума для каждого типа эжектора.
Обсуждение и заключение. Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют осуществлять рациональный выбор вакуумных эжекторов в зависимости от требуемых технологических задач. Это гарантированно обеспечит работоспособность автоматизированных вакуумных систем и производительность самого эжектора. Результаты исследований могут быть использованы всеми фирмами изготовителями эжекторов для корректировки их базовых каталогов и соответствующих рекомендаций по применению этих изделий.

Ключевые слова: глубина вакуума, вакуумный эжектор, питающее давление эжекторов

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам и редколлегии журнала за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили улучшить качество статьи.

Для цитирования. Савчук С.И., Умеров Э.Д., Абдулгазис А.У. Исследование оптимальной глубины вакуума, создаваемой эжектором в зависимости от величины питающего давления. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2025;25(1):43–51. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-1-43-51

Original Empirical Research

Investigation of the Optimal Vacuum Depth Created by an Ejector Depending on the Value of the Supply Pressure

Sergey I. Savchuk, Ervin D. Umerov ✉, Aziz U. Abdulgazis
Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov, Simferopol, Republic of Crimea
✉ Ervin777@yandex.ru

Abstract
Introduction. Vacuum ejectors operating on the Venturi principle are used in various industries and are essential pneumatic devices. An important characteristic of a vacuum ejector is the vacuum depth it creates, where the maximum vacuum value is obtained in a certain range of supply pressure. Failure to comply with the supply pressure affects the performance of the ejector itself and automated vacuum systems in general. One of the options for solving this problem is to establish the recommended range of supply pressure in a fairly narrow pressure range, at which a guaranteed value of vacuum depth is reached without using the maximum capabilities of the ejector. At the same time, the technical literature does not provide the values of the dependence of the vacuum depth on the supply pressure over the entire range of ejector operation, which the authors would like to draw attention to in this work. The research objective was to conduct experimental studies on establishing the true values of the maximum vacuum depth depending on the magnitude of the ejector input pressure.
Materials and Methods. To conduct experimental research, a special stand was designed, manufactured and used, which allowed for the study of vacuum ejectors operating on the basis of the Venturi principle. This stand provided setting the exact vacuum value depending on the input supply pressure for ejectors with a nozzle diameter from 0.1 to 4.0 mm, which completely covered the entire range of ejectors used in real sectors of the economy. Vacuum ejectors of the VEB, VEBL, VED and VEDL families manufactured by Camozzi were investigated in the range of the inlet supply pressure of the ejector from 2.0 to 6.5 bar. The true values of the vacuum depth were determined experimentally depending on the value of the input supply pressure for each ejector, as well as the maximum values of the vacuum depth reached by each ejector at the corresponding value of the input supply pressure.
Results. It was experimentally proved that the recommended values of the input supply pressure given in the catalogs of ejector manufacturers did not always correspond to the true values. It was shown that the character of the obtained graphs also differed. In this regard, it was necessary to adjust the value of the input supply pressure to reach the maximum vacuum depth for each type of ejector.

Discussion and Conclusion. The results of the conducted experimental studies allow for a rational choice of vacuum ejectors depending on the required technological tasks. This will ensure the operability of automated vacuum systems and the performance of the ejector itself. The research results can be used by all ejector manufacturers to adjust their basic catalogs and relevant recommendations for the use of these products.

Keywords: vacuum depth, vacuum ejector, supply pressure of ejectors

Acknowledgments. The authors would like to thank the reviewers and the Editorial board of the Journal for their attentive attitude to the article and the comments indicated, which allowed us to improve the quality of the paper.

For citation. Savchuk SI, Umerov ED, Abdulgazis AU. Investigation of the Optimal Vacuum Depth Created by an Ejector Depending on the Value of the Supply Pressure. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2025;25(1):43–51. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-1-43-51

Введение. В настоящее время в различных отраслях промышленности технологическое перемещение изделий и деталей производится с применением промышленных роботов, оснащенных вакуумными присосками, работа которых осуществляется с помощью эжектора [1], основанного на принципе Вентури. Производителями предлагается большой ассортимент эжекторов [2, 3], которые создают вакуум различной глубины в зависимости от питающего давления [4], что отвечает специфическим потребностям производства.

Оптимальную величину питающего давления воздуха на входе в эжектор, при котором достигается максимальная глубина вакуума, можно определить как оптимальное давление. Отклонение этого давления от заданного значения приводит к снижению глубины вакуума, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на производительности как эжектора, так и присоски, а также увеличивает энергетические затраты. Таким образом обеспечение оптимального питающего давления для эжектора с целью достижения максимальной производительности и снижения энергетических расходов становится весьма актуальной задачей.

При изучении эжекторов таких производителей, как Camozzi, Festo, Schmalz, SMC Pneumatics и других, было отмечено, что лишь небольшая часть производителей публикует в своих каталогах точные значения вакуума в зависимости от питающего давления для различных типов эжекторов. В основном информация представлена в виде общей диаграммы, соответствующей всей гамме выпускаемых эжекторов определенного типа, без учета диаметра их сопел.

Практический опыт авторов статьи, а также многолетнее сотрудничество с различными производственными участками, использующими вакуумные эжекторы, позволили выявить значительные расхождения между фактическими и табличными значениями питающих давлений и соответствующими значениями глубины вакуума. Поэтому исследования, направленные на определение точных зависимостей максимальной глубины вакуума, создаваемого эжектором от входного питающего давления, с целью достижения минимальных энергетических затрат представляют значительный интерес. Более глубокое изучение этих параметров возможно при использовании специально созданного экспериментального стенда, позволяющего с высокой степенью точности определять указанные параметры, что, в свою очередь, может способствовать повышению производительности всей системы.

Многочисленные исследования посвящены использованию вакуумных эжекторов [5] и вакуумной техники [6]. Авторы обращают внимание на теорию вакуума [7] и его физические основы [8], однако недостаточно акцентируют внимание на практической стороне его использования. В работе [9] рассматриваются конкретные случаи практического применения вакуума, в [10] представлены экспериментальные исследования с усовершенствованным соплом эжектора, а в [11] — моделирование потоков. Однако в современной научной литературе практически не уделяется внимания вопросам, касающимся зависимости величины получаемого вакуума от входного питающего давления и параметров вакуумных эжекторов. Описание характеристик вакуумных эжекторов можно найти преимущественно в справочной литературе, такой как каталоги производителей вакуумного оборудования, например, итальянской компании Camozzi или немецкой фирмы Schmalz.

В работе [12] предложено изменять геометрические размеры сопла эжекторов, что позволяет увеличивать их производительность. В экспериментальной работе [13] приведены результаты исследования, в котором изменялся угол наклона камеры смешения эжектора, что также способствовало повышению его производительности. В работе [14] автором предпринята попытка исследовать основные характеристики вакуумных эжекторов и была предложена методика экспериментальных исследований, что получило логическое продолжение в работе [15].

Учитывая все вышеизложенное, авторы поставили перед собой цель —проведение экспериментальных исследований для определения фактических значений максимальной глубины вакуума в зависимости от величины входного давления эжектора.

Материалы и методы. Для проведения натурных исследований вакуумных эжекторов был использован специальный стенд [15], разработанный авторами статьи и представленный на рис. 1.

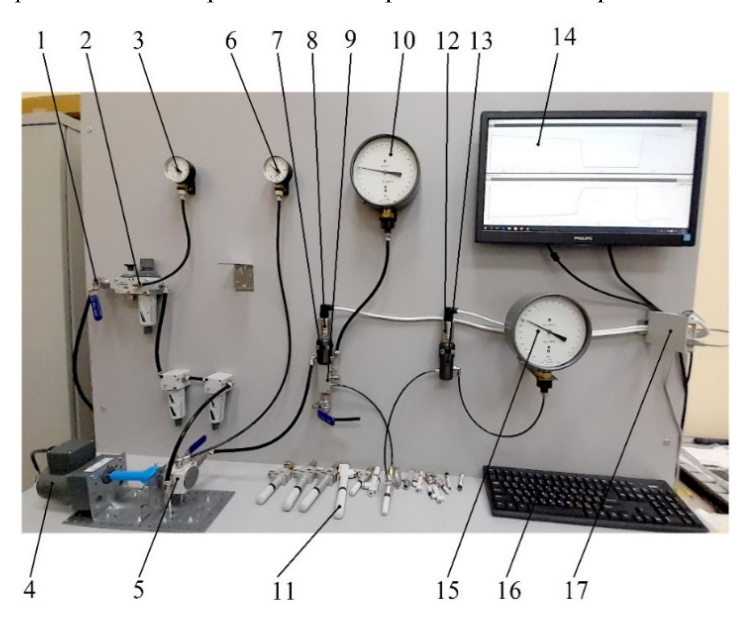


Рис. 1. Стенд для проведения экспериментальных исследований

Таблица 1

Состав стенда для проведения экспериментальных исследований

	Обозначение	Тип/модель
1	Входной воздушный кран	Кран шаровой V2E-316-PP-1/4
2	Входной блок	Модульный блок подготовки воздуха MC104-N-5-FL
3	Контрольный манометр	Манометр M063-R12
4	Электронный привод с регулятором	Мотор-редуктор 80YT25WGV22H/80GK150H с контроллером WS-L (25W)
5	Основной регулятор с запорным краном	Регулятор давления MC104-R05 с краном шаровым V2E-316-PP-1/4
6	Контрольный манометр	Манометр M063-R12
7	Тройник	
8	Датчик давления	Датчик давления МИДА-ДИ-15-RS485-0,15(0,25; 0,5)/0-1,6 МПа-064-M20-DIN C
9	Раздаточный коллектор	Коллектор 3053 1/4-3L-1/8
10	Контрольный манометр	Манометр деформационный образцовый с условной шкалой модель 11202 кл. точности 0,4 16 кГс/см^2); МО
11	Исследуемый эжектор	
12	Датчик абсолютного давления	Датчик давления МИДА-ДА-15-RS485-0,15(0,25; 0,5)/0-0,1 МПа-064-M20-DIN C
13	Тройник	
14	Монитор компьютера	
15	Контрольный вакуумметр	Вакуумметр деформационный образцовый с условной шкалой модель 11201 кл. точности 0,4 (–0,1 мПа); ВО
16	Компьютер	Условно показана только клавиатура
17	Контроллер датчиков	Устройство связи МИДА-УС-410

В рамках исследования были изучены вакуумные эжекторы семейств VEB, VEBL, VED и VEDL, производимые компанией Camozzi [8], в диапазоне входного давления, питающего эжектор, от 2,0 до 6,5 бар. Основной задачей исследования стало установление фактических значений глубины вакуума в зависимости от величины входного питающего давления для каждого из эжекторов. Кроме того, было необходимо экспериментально определить максимальные значения глубины вакуума, которые способны достичь каждый из эжекторов, а также соответствующее этим значениям глубины вакуума входное питающее давление. Полученные параметры впоследствии будут необходимы для проведения следующих серий экспериментов, направленных на установление времени создания вакуума в объеме одного литра при различных заданных глубинах вакуума.

Для каждого эжектора из рассматриваемых семейств было проведено не менее 17 экспериментов. При этом для каждого отдельного эксперимента устанавливалась своя фиксированная скорость вращения маховика основного регулятора давления 5. Цель этих установок заключалась в обеспечении максимальной плавности изменения параметров, а также в исключении пропусков каких-либо значимых событий в ходе эксперимента.

Результаты исследования. Ниже представлены полученные в результате эксперимента графики зависимости изменения глубины вакуума от величины питающего давления по сериям эжекторов (рис. 2–5), а также проведено сравнение полученных данных с аналогичными параметрами эжекторов, предоставленными в каталоге Camozzi.

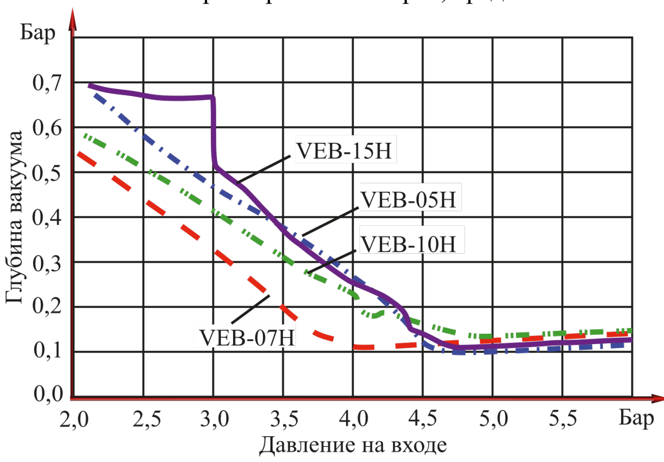


Рис. 2. Диаграммы зависимости изменения глубины вакуума от величины питающего давления для эжекторов серии VEB

Анализ экспериментальных данных показывает, что для эжектора VEB-05H максимальная глубина вакуума достигает величины 90,5 % (остаточное давление 96 мбар) при питающем давлении 4,73–4,74 бара. Согласно информации, приведенной в каталоге производителя для эжектора VEB-05H, оптимальное питающее давление составляет 4,5 бара, при этом должна быть достигнута глубина вакуума в 82 %, что соответствует остаточному давлению 182 мбар. Данное значение согласуется с диаграммой в каталоге производителя, на которой показана зависимость глубины вакуума от величины питающего давления для эжекторов семейства VEB. Авторами установлено, что для эжектора VEB-05H при питающем давлении 4,5 бара (рекомендуемом значении от производителя) глубина вакуума также составляет 88,65 % (остаточное давление 115 мбар).

Что касается эжектора VEB-07H, то экспериментальные данные показали, что его глубина вакуума достигает 89,34 % (остаточное давление 108 мбар) при питающем давлении в диапазоне 4,07–4,08 бара. Сопоставив с данными, предоставленными производителем для эжектора VEB-07H, обнаружили, что оптимальное питающее давление для этого устройства также составляет 4,5 бара, при котором глубина вакуума должна составлять 85 % (остаточное давление 152 мбар). Это значение не соответствует значениям, представленным в каталоге компании, где показана зависимость изменения глубины вакуума от величины питающего давления для эжекторов семейства VEB. Установлено, что при питающем давлении 4,5 бара (рекомендованном значении для эксплуатации эжектора VEB-07H) глубина вакуума достигает 88,65 % (остаточное давление 115 мбар). Таким образом, существующие расхождения между экспериментальными данными и сведениями, предоставленными производителем, требуют дополнительного анализа и могут свидетельствовать о необходимости пересмотра рекомендуемых параметров эксплуатации эжекторов.

Экспериментально установлено, что для эжектора VEB-10H глубина вакуума достигает величины 86,9 % (остаточное давление 132,6 мбар) при питающем давлении 4,9 бара. Данные, предоставленные производителем эжектора VEB-10H, указывают на то, что оптимальное питающее давление составляет 5 бар, при этом глубина вакуума должна достигать 85 % (остаточное давление 152 мбар). Это значение соответствует диаграмме зависимости, представленному в каталоге производителя, которая демонстрирует изменение глубины вакуума в зависимости от величины питающего давления для эжекторов семейства VEB. В процессе исследования авторами установлено, что для эжектора VEB-10H при питающем давлении 5 бар (величине, рекомендованной как оптимальная для эксплуатации этого устройства) глубина вакуума достигает 86,8 % (остаточное давление 133,5 мбар).

Особый интерес представляет необычное поведение графика зависимости в диапазоне питающего давления от 4 до 4,2 бар (рис. 3).

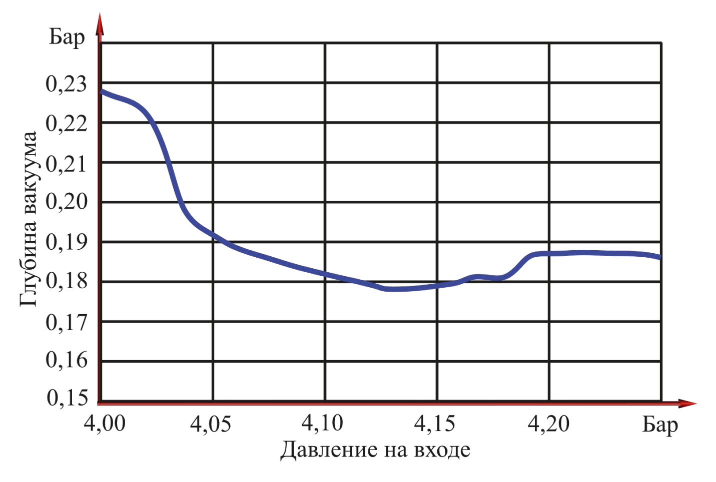


Рис. 3. Необычное поведение графика

Для эжектора VEB-15H экспериментально установлено, что глубина вакуума достигает величины 89,24 % (остаточное давление 109 мбар) при питающем давлении 4,75 бара. Данные, предоставленные производителем эжектора VEB-15H, указывают на то, что оптимальное питающее давление составляет 4,5 бар при условии, что глубина вакуума достигает 85 % (остаточное давление 152 мбар). Это значение, вероятно, соответствует диаграмме, представленной в каталоге фирмы, которая демонстрирует зависимость изменения глубины вакуума от величины питающего давления для эжекторов семейства VEB. В ходе проведенных исследований было установлено, что для эжектора VEB-15H при питающем давлении 4,5 бара, рекомендованном производителем как оптимальное для его эксплуатации, глубина вакуума достигла 85,69 % (остаточное давление 145 мбар).

Особое внимание следует уделить резкому падению значений вакуума в диапазоне питающего давления от 2,95 до 3,0 бара (рис. 2). Причины данного поведения графика предполагается изучить в будущем в рамках разработки математической модели эжектора.

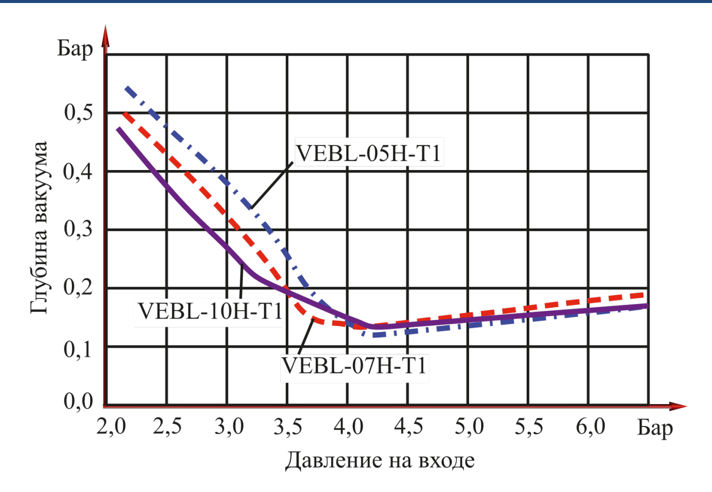


Рис. 4. Диаграммы зависимости изменения глубины вакуума от величины питающего давления для эжекторов серии VEBL

Анализ экспериментальных данных показывает, что для эжектора VEBL-05H-T1 глубина вакуума достигает величины 88,06 % (остаточное давление 121 мбар) при питающем давлении 4,2 бара.

Информация от производителя по эжектору VEBL-05H-T1 указывает на то, что оптимальное питающее давление составляет 4,5 бара, при этом остаточное давление в линии вакуума должно достигать значения 160 мбар. Данные соответствуют графикам, представленным в каталоге производителя, которые демонстрируют зависимость изменения глубины вакуума от величины питающего давления для эжекторов семейства VEBL. В ходе проведённых исследований было установлено, что для эжектора VEBL-05H-T1 при рекомендуемом питающем давлении 4,5 бара остаточное давление в линии вакуума составляет 127 мбар, что соответствует глубине вакуума 87,47 %.

Для эжектора VEBL-07H-T1 экспериментально установлено, что минимальное остаточное давление в линии вакуума достигает величины 133 мбара (86,87 %) при питающем давлении 4,1 бара.

Данные, представленные производителем по эжектору VEBL-07H-T1, указывают на оптимальное питающее давление в 4,5 бара. При этом остаточное давление в линии вакуума должно достигать величины 150 мбар. Это значение подтверждается диаграммой, приведенной в каталоге производителя, которая иллюстрирует зависимость изменений глубины вакуума от величины питающего давления для эжекторов семейства VEBL. Результаты проведенных исследований показывают, что для эжектора VEBL-07H-T1, при питающем давлении 4,5 бара, рекомендованном производителем как оптимальное для его эксплуатации, остаточное давление в линии вакуума составляет 142 мбара, что соответствует глубине вакуума 85,99 %.

Что касается эжектора VEBL-10H-T2, то экспериментально установлено, что минимальное остаточное давление в линии вакуума достигает величины 133 мбар, что соответствует глубине вакуума 86,87 %, при питающем давлении 4,22 бара. Данные, предоставленные производителем для эжектора VEBL-10H-T2, указывают на оптимальное питающее давление в 4,5 бара, при этом остаточное давление в линии вакуума должно достигать величины 150 мбар. Это значение соответствует диаграмме, представленной в каталоге изготовителя, которая иллюстрирует зависимость изменений глубины вакуума от величины питающего давления для эжекторов семейства VEBL. Проведенные исследования показывают, что для эжектора VEBL-10H-T2 при рекомендуемом производителем питающем давлении в 4,5 бара остаточное давление в линии вакуума составляет 138 мбар, что переводится в глубину вакуума 86,38 %.

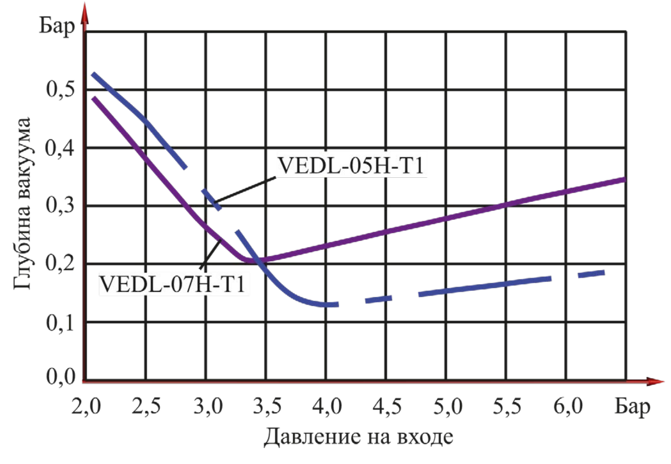


Рис. 5. Диаграммы зависимости изменения глубины вакуума от величины питающего давления для эжекторов серии VEDL

Анализ экспериментальных данных показывает, что для эжектора VEDL-05H-T1 минимальное остаточное давление в линии вакуума достигает величины 130 мбар (глубина вакуума 87,17 %) при питающем давлении 4,0 бара. Данные, приведенные фирмой изготовителем по эжектору VEDL-05H-T1, указывают на оптимальное питающее давление 4,5 бар, при этом в линии вакуума должно быть достигнуто остаточное давление 170 мбар. Это значение соответствует приведенной в каталоге фирмы изготовителя диаграмме зависимости изменения глубины вакуума от величины питающего давления для эжекторов семейства VEDL. Проведенные исследования показывают, что для эжектора VEDL-05H-T1 при питающем давлении 4,5 бара (величина, рекомендуемая фирмой изготовителем как оптимальная при эксплуатации эжектора VEDL-05H-T1), остаточное давление в линии вакуума составляет 142,6 мбар, что соответствует глубине вакуума 85,9 %.

Экспериментально установлено, что для эжектора VEDL-07H-T1 минимальное остаточное давление в линии вакуума достигает величины 207 мбар (79,57 %) при питающем давлении 3,4 бара. Данные, представленные фирмой изготовителем по эжектору VEDL-07H-T1, указывают на оптимальное питающее давление 4,5 бар, при этом остаточное давление в линии вакуума должно достигнуто 150 мбар. Это значение соответствует приведенной в каталоге фирмы изготовителя диаграмме зависимости изменения глубины вакуума от величины питающего давления для эжекторов семейства VEDL. Проведенные исследования показывают, что для эжектора VEDL-07H-T1 при питающем давлении 4,5 бара (величина, рекомендуемая фирмой изготовителем как оптимальная при эксплуатации эжектора VEDL-07H-T1) остаточное давление в линии вакуума составляет 256 мбар, что соответствует глубине вакуума 74,73 %.

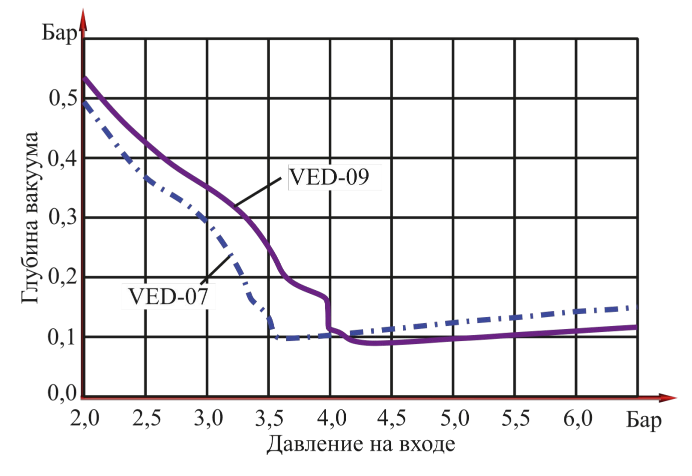


Рис. 6. Диаграммы зависимости изменения глубины вакуума от величины питающего давления для эжекторов серии VED

Анализ экспериментальных данных показывает, что для эжектора VED-07 минимальное остаточное давление в линии вакуума достигает величины 98 мбар (90 %) при питающем давлении 3,63 бара. Данные, приведенные фирмой изготовителем по эжектору VED-07, указывают на оптимальное питающее давление 5 бар, при этом должен быть достигнут вакуум глубиной 90 % (остаточное давление 101 мбар). Это значение не соответствует приведенной в каталоге фирмой изготовителем диаграмме зависимости изменения глубины вакуума от величины питающего давления для эжекторов семейства VED. Проведенные исследования показывают, что для эжектора VED-07 при питающем давлении 5 бар (величина, рекомендуемая фирмой изготовителем как оптимальная при эксплуатации эжектора VED-07), остаточное давление в линии вакуума составляет 124 мбар, что соответствует глубине вакуума 87,76 %.

Экспериментально установлено, что для эжектора VED-09 минимальное остаточное давление в линии вакуума достигает величины 90 мбар (91,12 %) при питающем давлении 4,34 бара. Данные, приведенные фирмой изготовителем по эжектору VED-09, указывают на оптимальное питающее давление 5 бар, при этом должен быть достигнут вакуум глубиной 89 % (остаточное давление 111,5 мбар). Это значение не соответствует приведенной в каталоге фирмы изготовителя диаграмме зависимости изменения глубины вакуума от величины питающего давления для эжекторов семейства VED. Проведенные исследования показывают, что для эжектора VED-09 при питающем давлении 5 бар (величина, рекомендуемая фирмой изготовителем как оптимальная при эксплуатации эжектора VED-09) остаточное давление в линии вакуума составляет 98 мбар, что соответствует глубине вакуума 90,33 %.

Представляет интерес резкое падение значения глубины вакуума и возникновение колебаний показаний глубины вакуума в интервале значений питающего давление от 3,95 до 4,4 бара (рис. 6).

Обсуждение и заключение. Момент появления колебаний, зафиксированный в ходе всех экспериментов, сопровождался заметными изменениями звука выхлопа. Считаем, что такой характер поведения может быть связан с резким изменением характера течения воздуха, что может указывать на наличие производственного дефекта в данном эжекторе. Для подтверждения этого вывода необходимо провести дополнительные эксперименты с другими эжекторами из данной серии. Дополнительно стоит рассмотреть возможность исследования поверхности канала эжектора с целью оценки точности геометрических форм и качества обработки поверхности.

Согласно результатам проведенных экспериментальных исследований вакуумных эжекторов, можно сделать вывод о том, что фактические значения глубины вакуума варьируются в зависимости от величины входного питающего давления и отличаются от значений, представленных производителем. Кроме того, характер графиков также имеет свои отличия. Например, поведение графика на рис. 3 указывает на возможное наличие производственного дефекта в канале эжектора. Актуальным в этой связи является построение математической модели эжекторов, позволяющей на уровне модели изучить факторы, обуславливающие столь специфическое поведение графика. Понимание этих факторов поможет выработать рекомендации по улучшению технологических процессов производства вакуумных эжекторов.

В связи с этим необходимо вводить корректировку величины входного питающего давления для достижения максимальной глубины вакуума для каждого типа эжектора, что будет влиять на производительность как самих эжекторов, так и автоматизированных вакуумных систем.

Полученные результаты исследований могут быть полезны для всех производителей эжекторов с целью корректировки их базовых каталогов и соответствующих рекомендаций по применению этих изделий. В дальнейшем авторы планируют продолжить серию экспериментов, направленных на определение времени создания вакуума в одном литре объема при различных заданных глубинах вакуума.

Список литературы / References

1. Li Macia, Castilla R, Gamez-Montero PJ, Camacho S, Codina E. Numerical Simulation of a Supersonic Ejector for Vacuum Generation with Explicit and Implicit Solver in Openfoam. *Energies.* 2019;12(18):3553. https://doi.org/10.3390/en12183553

2. Besagni G, Mereu R, Inzoli F. Ejector Refrigeration: A Comprehensive Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;53:373–407. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.059

3. Arun Kumar R, Rajesh G. Physics of Vacuum Generation in Zero-Secondary Flow Ejectors. *Physics of Fluids.* 2018;30(6):066102. https://doi.org/10.1063/1.5030073

4. Jafarian A, Azizi M, Forghani P. Experimental and Numerical Investigation of Transient Phenomena in Vacuum Ejectors. *Energy.* 2016;102:528–536. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.101

5. Levchenko D, Meleychuk S, Arseniev V. Regime Characteristics of Vacuum Unit with a Vortex Ejector Stage with Different Geometry of Its Flow Path. *Procedia Engineering.* 2012;39:28–34. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.004

6. Kumar V, Sachdeva G. 1-D Model for Finding Geometry of a Single Phase Ejector. *Energy.* 2018;165(A):75–92. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.071

7. Sobolev AV. Intensification of Mixing by Small-Size Jets in Ejectors with Central Nozzle. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2013;20(3):273–276. URL: https://link.springer.com/article/10.1134/S0869864313030025 (accessed: 10.11.2024).

8. Karthick SK, Srisha MV Rao, Jagadeesh G, Reddy KPJ. Parametric Experimental Studies on Mixing Characteristics within a Low Area Ratio Rectangular Supersonic Gaseous Ejector. *Physics of Fluids.* 2016;28(7):076101. https://doi.org/10.1063/1.4954669

9. Гессе С. *Сжатый воздух как носитель энергии.* Москва: Фесто; 2004. 128 с.

Hesse S. *Compressed Air as an Energy Carrier*. Moscow: Festo; 2004. 128 p. (In Russ.)

10. Goodman N, Leege BJ, Johnson PE. An Improved de Laval Nozzle Experiment. *International Journal of Mechanical Engineering Education.* 2021;50(2):513–537. https://doi.org/10.1177/03064190211034165

11. Moukalled F, Mangani L, Darwish M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics.* Springer: Cham; 2016. 791 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6

12. Jia Yan, Shengyu Li, Zhan Liu. Numerical Investigation on Optimization of Ejector Primary Nozzle Geometries with Fixed/Varied Nozzle Exit Position. *Applied Thermal Engineering.* 2020;175:115426. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115426

13. Kun Zhang, Shengqiang Shen S., Yong Yang, Xingwang Tian. Experimental Investigation of Adjustable Ejector Performance. *Journal of Energy Engineering.* 2011;138(3):125–129. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000058

14. Савчук С.И. Исследование параметров вакуумных эжекторов, применяемых при сборке и ремонте автомобилей. *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета.* 2016;53(3):58–64. URL: https://uz.kipu-rc.ru:9443/sn/53.pdf (дата обращения: 28.11.2024).

Savchuk SI. Study of parameters of Vacuum Ejectors Used in the Assembly and Repair of Cars. *Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University.* 2016;53(3):58–64. URL: https://uz.kipu-rc.ru:9443/sn/53.pdf (accessed: 28.11.2024).

15. Савчук С.И., Э.Д. Умеров, Абдулгазис У.А. Стенд для оценки глубины вакуума, подводимого к специализированным присоскам, используемым в технологических процессах сервиса при эксплуатации и производстве автомобилей. *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета.* 2023;82(4):225–230.

Savchuk SI, Umerov ED, Abdulgazis UA. A Stand for Assessing the Depth of Vacuum Supplied to Specialized Suction Cups Used in Technological Processes of Service during Operation and Production of Cars. *Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University.* 2023;82(4):225–230.

Об авторах:

Сергей Игоревич Савчук, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (295015, Республика Крым, г. Симферополь, пер. Учебный, 8), ORCID, ofelos@outlook.com

Эрвин Джеватович Умеров, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (295015, Республика Крым, г. Симферополь, пер. Учебный, 8), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, Ervin777@yandex.ru

Азиз Умерович Абдулгазис, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (295015, Республика Крым, г. Симферополь, пер. Учебный, 8), SPIN-код, ORCID, abdulgazis.aziz@mail.ru

Заявленный вклад авторов:
С.И. Савчук: проведение исследования.
Э.Д. Умеров: написание рукописи — рецензирование и редактирование.
А.У. Абдулгазис: визуализация.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Sergey I. Savchuk, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Motor Transport Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (8, Uchebnyi Lane, Simferopol, 295015, Republic of Crimea), ORCID, ofelos@outlook.com

Ervin D. Umerov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Motor Transport Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (8, Uchebnyi Lane, Simferopol, 295015, Republic of Crimea), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, Ervin777@yandex.ru

Aziz U. Abdulgazis, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Motor Transport Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (8, Uchebnyi Lane, Simferopol, 295015, Republic of Crimea), SPIN-code, ORCID, abdulgazis.aziz@mail.ru

Claimed Contributorship:
SI Savchuk: conducting the research.
ED Umerov: manuscript writing — reviewing and editing.
AU Abdulgazis: visualization.

Conflict of Interest Statement: **the authors do not have any conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 15.12.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 10.01.2025
Принята к публикации / Accepted 17.01.2025